

JP3148189

Title:

STABILIZING DEVICE OF OSCILLATION FREQUENCY OF SEMICONDUCTOR LASER

Abstract:

PURPOSE:To realize high stability of frequency and set accuracy by carrying out frequency conversion of a frequency of beat signal by local signal, by applying phase continuous frequency modulation to a standard signal for frequency modulation of reference beam and by detecting error signal synchronously by using detection light branched from the reference beam. **CONSTITUTION:**A frequency of a beat signal BT is converted by a local signal by a mixer 42 of a frequency conversion part 40 and phase thereof is compared with that of a standard signal SS at an offset lock signal generation part 50; and an offset lock signal is thereby detected and fed back to a reference beam frequency variable oscillator 20. Phase continuous frequency modulation is applied to the standard signal SS by a repetition signal RS which is supplied by a modulation signal oscillator 71 and a frequency of output light of a reference laser 21 is modulated through the offset lock signal. Meanwhile, an error signal ES is synchronously detected by the repetition signal RS by a synchronous wave detecting means 62 through an optical synthesizing and analyzing means 31 and an optical frequency recognizing means 61 by repetition signal RS using a detection light DLD containing output light of the reference laser 21 and fed back to a stabilized photo frequency variable oscillator 10. Thereby, oscillation frequency can be stabilized accurately.

⑫ 公開特許公報(A)

平3-148189

⑮ Int. Cl.⁵

識別記号

庁内整理番号

⑯ 公開 平成3年(1991)6月24日

H 01 S 3/133
H 04 B 10/04

6940-5F

8523-5K H 04 B 9/00

S

審査請求 未請求 請求項の数 1 (全16頁)

⑰ 発明の名称 半導体レーザの発振周波数安定化装置

⑱ 特 願 平1-286651

⑲ 出 願 平1(1989)11月2日

⑳ 発 明 者 石 田 修 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

\textcircled{21} 発 明 者 鳥 羽 弘 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

\textcircled{22} 出 願 人 日本電信電話株式会社 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号

\textcircled{23} 代 理 人 弁理士 志賀 正武

明 細 書

1. 発明の名称

半導体レーザの発振周波数安定化装置

2. 特許請求の範囲

半導体レーザにより構成される被安定化光周波数可変発振器の出力である被安定化光の光周波数を、誤差信号の入力により所定の値に安定化する半導体レーザの発振周波数安定化装置において、

(a)オフセットロック信号の入力により光周波数が前記被安定化光の光周波数に対して所定の周波数差となるように制御された参照光を供給する参照レーザにより構成される参照光周波数可変発振器と、

(b)前記被安定化光と前記参照光とを入射して、両光の混合光と、被安定化光と、少なくとも参照光の一部を含む検出光とを出力する光合分波手段と、

(c)前記混合光の入力から光電変換によりビート信号を検出するビート信号検出手段と、

(d)所定周波数の局発信号を供給する局発振器

と、該局発信号を用いて前記ビート信号の入力から中間周波数信号を発生するミキサとからなる少なくとも1段の周波数変換部と、

(e)所定周波数の基準信号を供給する基準発振器と、該基準信号と前記中間周波数信号の入力とを比較して両信号の位相差を出力する位相比較手段と、前記位相差の入力によりオフセットロック信号を出力するループフィルタとからなるオフセットロック信号発生部と、

(f)前記局発振器と前記基準発振器の少なくともいずれか一つに位相連続周波数変調を施すための所定周期の繰り返し信号を供給する変調信号発振器と、

(g)前記検出光の入力により該検出光に含まれる光周波数成分に応じた強度の検出信号を発生する光周波数弁別手段と、該検出信号中より前記繰り返し信号を用いて誤差信号を検出する同期検波手段とからなる誤差信号発生部と、

を具備することを特徴とする半導体レーザの発振周波数安定化装置。

3. 発明の詳細な説明

「産業上の利用分野」

本発明は、光周波数可変(あるいは波長可変)半導体レーザの発振周波数を、任意の光周波数値に、かつ高い精度で安定化することができる半導体レーザの発振周波数安定化装置に関するものである。

「従来の技術」

光ファイバの持つ広い周波数帯域を有効に利用出来る光周波数多重(光FDM)通信方式や、光共振器や光干渉計の精密な特性評価、高い精度での物質の分光分析等においては、発振光周波数が安定で、かつ広い光周波数可変範囲を有する光周波数可変発振器が必要である。光周波数可変範囲に関しては、既に近年の光通信用波長可変半導体レーザに関する活発な研究により、単一光周波数で発振し、かつ100GHzを上回る広い光周波数可変範囲を有する光周波数可変発振器が、多電極DFB(分布帰還形)レーザや多電極DBR(分布反射形)レーザ等で実現されるに至っている(例えば、K. Kobayashi and I. Mito, "Single

Frequency and Tunable Laser Diodes", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.LT-6, pp.1623-1633, 1988参照)。この場合、光の周波数は、一般にレーザの電極に注入される電流値を変化させることによって制御される。

しかしながら、一般に、DFBレーザやDBRレーザといった半導体レーザの発振光周波数の安定度は劣悪である。これは、半導体レーザの発振光周波数が、レーザ自身の温度によっても変化するため、典型的な感度は10~20GHz/Kである。半導体レーザを発振させるための電流注入には発熱が伴うため、例えば温度検出器とパルチエ素子を利用した温度安定化装置により、注意深く温度を制御した場合においてもなお、1ms程度の短時間で1MHz以上、1分以上といった長時間では数十から数百MHzもの周波数揺らぎが残ってしまう。

これらの周波数揺らぎは、例えば光ヘテロダイン通信をおこなう際に大きな障害となる。このため、例えば局部発振光供給用半導体レーザは、温

-3-

度安定化装置のみならず、受信光との光周波数差を検出して一定値となるように制御する自動周波数制御回路(AFC)や、光周波数基準によってその絶対値を安定化する回路を用いて、相対的もしくは絶対的な光周波数揺らぎを、長時間でも数MHz以内に抑える工夫がなされている。なお、光周波数基準としては、ファブリーペロー干渉計の透過特性や、原子・分子気体の吸収スペクトル等が利用されている(例えばY. C. Chung et al., "Novel FSK Heterodyne Single-Filter Detection System Using No IF Frequency Lock", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol.1, pp.140-141, 1989参照)。したがって、前述した様な広い周波数可変幅を有する半導体レーザを、例えば光FDM通信へ応用する場合には、その発振周波数を変化可能な光周波数領域内において、任意の周波数値に数MHz以下程度の高い周波数安定度で安定化する工夫が必要となる。

このような、広い周波数設定範囲と高い周波数安定度とを両立させるために、K. Kubokiらは、

-4-

2台の半導体レーザの光周波数差を、周波数オフセットロッキングと呼ばれる方法で相対的に安定化し、かつ一方のレーザの発振周波数をファブリーペロー共振器に安定化する方法を提案している(K. Kuboki and M. Ohitsu, "Frequency Offset Locking of AlGaAs Semiconductor Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.QE-23, pp.388-394, 1987参照)。以下、図面を用いてこの従来例を説明する。

第2図は、上述した方法を適用した従来の半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示す図である。被安定化レーザ111および参照レーザ121は、それぞれ温度制御装置112および122により温度安定化され、発振光周波数ゆらぎは1時間当たり20MHz程度にまで抑えられている。また、それぞれのレーザの出射光は、光アイソレータ113および123を介して取り出され、反射戻り光によって発振光周波数が乱されたり、発振状態が不安定になることを防いでいる。半導体レーザの発振光周波数は、注入電流によっ

て $1\text{GHz}/\text{mA}$ 程度の割合で変化するので、注入電流制御装置 114 および 124 への入力信号によって、それぞれの半導体レーザの発振光周波数が制御される。すなわち、第 2 図中に一点鎖線で囲んで示した半導体レーザ及びその周辺要素により、被安定化光周波数可変発振器 110 および参照光周波数可変発振器 120 が構成されている。

この被安定化光周波数可変発振器 110 の出力である被安定化光 I_d と、参照光周波数可変発振器 120 の出力である参照光 rId は、光合分波手段 131 に入力される。被安定化光 I_d からビームスプリッター 131a で、また参照光 rId からビームスプリッター 131b で、それぞれ被安定化光出力と検出光 dId とが分岐出力され、さらにそれぞれの他の分岐光がビームコンバイナー 131c で合波されて、混合光 mId が出力される。この混合光 mId を受光器 132 に入射して光電変換を施すことにより、被安定化光 I_d と参照光 rId の光周波数差で電氣的に振動するビート信号 bt が検出される。ここで検出可能な差周波数の上限は、現在の

半導体フォトダイオードを用いた場合は $20 \sim 30\text{GHz}$ 程度である。

このビート信号 bt の周波数が一定値となるように、位相同期ループ (PLL) の技術を用いて被安定化光周波数可変発振器 110 を制御するのが、オフセットロック信号発生部 150 である。ビート信号 bt の位相と、マイクロ波周波数シンセサイザ (発振器) 151 の出力する基準信号 ss の位相とが、位相比較器 152 で比較される。ここで、ビート信号 bt の周波数 f_b と基準信号 ss の周波数 f とが異なっていると、位相は周波数の積分値であるので、位相比較器 152 で検出される位相差は、単調に増加もしくは減少する。したがって、検出された位相差を、ループフィルタ 153 を通じてオフセットロック信号 os として被安定化光周波数可変発振器 110 へフィードバックすることにより、位相差は常に一定に保たれ、結果として両レーザの光周波数は相対的にオフセットロックされる。ここで、半導体レーザ特有の大きな位相雑音 (例えば、スペクトル線幅にして 20MHz 程度)

-7-

に対処するため、位相比較器 152 は、広い位相比較可能範囲を有することが必要である。例えば、前述した K. Kuboki 等の報告では、 $\pm 4096\pi$ の位相差までを検出可能な、ディジタル回路により構成された位相比較器が用いられている。なお、ループフィルタ 153 は、応答特性を決定したり、不必要な雑音を除去する働きをする。

一方、参照光 rId からビームスプリッター 131b で分岐された検出光 dId は、誤差信号発生部 160 の光周波数弁別手段 161 に入射される。すなわち、検出光 dId は、光周波数基準となるファブリーペロー干渉計 161a に入射され、その出力光強度が受光器 161b で検出されて、検出電圧 dv として出力される。この検出電圧 dv は、定電圧源 164 の電圧を可変抵抗器 165 で適当に分圧した参照電圧 rv と、差動増幅器 166 で比較される。そして、この両電圧の差は、PID (比例・積分・微分) 制御器 163 を介して、誤差信号 es として参照光周波数可変発振器 120 にフィードバックされる。ここで、PID 制御器 163 は、入力

-8-

電圧に対して、比例・積分・微分の少なくとも一演算を施した電圧を出力する働きをし、参照光周波数可変発振器 120 を制御する際の、応答特性および定常特性を改善するために用いられる。

次に、第 2 図に示す構成の従来例によって、被安定化レーザ 111 の発振周波数を、広い光周波数可変帯域にわたって安定化する際の動作を、第 3 図 (a-1) および (a-2) を用いて説明する。第 3 図 (a-1) は、ファブリーペロー干渉計 161a と受光器 161b とからなる光周波数弁別手段 161 の特性を示す図であって、横軸が入射される検出光 dId の光周波数、縦軸が検出電圧 dv である。例えば約 5cm 間隔のファブリーペロー干渉計を用いれば、周期間隔 $\Delta \nu$ が 3GHz の周期的光周波数弁別特性が得られる。ここで、検出光 dId は参照光 rId から構成されるので、横軸は参照光 rId の光周波数 ν_r に相当する。したがって可変抵抗器 165 を調整して参照電圧 rv を適当な値 (例えば検出電圧 dv の最大値の半分) に設定すれば、検出電圧 dv が参照電圧 rv と等しくなるように、前述し

た誤差信号 es によって参照光周波数可変発振器 120 がフィードバック制御され、参照光 rld の光周波数 ν_r は特定の値に安定化される。この場合、安定化する光周波数は、図中の黒丸で示した光周波数基準値 $(\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_N, \dots)$ の内から選ぶことが出来る。

一方、被安定化光 ld の光周波数 ν は、オフセットロック信号発生部 150 の前述した働きにより、参照光 rld の光周波数 ν_r にオフセットロックングされており、基準信号 ss の周波数を f とすれば、

$$\nu = \nu_r \pm f \quad \dots \dots (1)$$

となっている。このため、参照光 ν_r が上述した光周波数基準値 $\nu_n (n=0, 1, \dots, N, \dots)$ に安定化されていれば、結局、被安定化光 ld の光周波数は、

$$\nu = \nu_n \pm f \quad \dots \dots (2)$$

に安定化される。ここで、基準信号 ss の周波数 f は、例えば前述した K. Kuboki 等の文献に示されているように、0.08 ~ 1.3 GHz 程度の範囲で変化させることが出来る。したがって、第 3 図(a-2)に示す様に、参照光 rld を安定化する光周

波数基準値 ν_n を適当に選び、かつ基準信号 ss の周波数 f を変化させることによって、50 GHz を越える様な広い光周波数範囲にわたって、ほぼ任意の光周波数値に被安定化半導体レーザの発振周波数を安定化することが可能となっている。

「発明が解決しようとする課題」

しかしながら、上記従来例では、被安定化半導体レーザの周波数設定精度及び安定度が著しく制限されるとともに、場合によっては安定化可能な光周波数範囲が制限されてしまう。これを以下に詳述する。

上述した周波数設定精度及び安定度は、主として

(1) 参照光 rld の光周波数 ν_r を、光周波数基準であるファブリーペロー干渉計 161a に安定化する際の、周波数設定精度及び安定度

(2) 光の周波数基準自体の確度及び安定度によって制限され、それぞれについて、以下に説明するような制限要因が存在する。

まず、上記(1)に関して、上述した従来例では、

-11-

光周波数弁別手段 161 の出力する検出電圧 dv を、可変抵抗器 165 で設定される参照電圧 rv と比較して誤差信号 es を得るという検出方式を用いている。このため、光周波数基準値 ν_n が、ファブリーペロー干渉計 161a の透過特性だけで決定されないという、重大な問題が存在する。すなわち、光周波数基準値 ν_n は、第 3 図(b-1)に例示するように、参照電圧 rv の設定値にも依存する。これは、明らかに、光周波数の設定精度を制限する要因となる。

同様に、上述した従来例の誤差信号検出方式では、参照光 rld の光強度変化が、光周波数基準値 ν_n の設定精度および安定度に、直接影響を与える。すなわち、第 3 図(b-2)に例示するように、検出光 dld の光強度が減少すると、光周波数基準値が ν_n から ν_n' に変化してしまう。例えば、ファブリーペロー干渉計 161a のフィネスを 100、フリースペクトルレンジ(FSR)を 3 GHz と仮定し、初期状態での検出電圧 dv の最大値の 1/2 を安定点として設定した場合、概算して 10% の

-12-

強度変化当たり、1.5 MHz 程度の誤差が生じてしまう。一般に、半導体レーザの出力には、長期的にみて数%以上の光出力変動が存在し、さらに注入電流を変化させて光周波数を変化させた場合には、光出力強度も同時に変化する。例えば前述した K. Kuboki 等の報告においては、発振周波数を 50 GHz 変化させた場合に、光強度は 50% も変化している。このため、1 MHz 以下の設定精度及び安定度を実現するのは、はなはだ困難である。

さらに同検出方式は、受光器 161b と差動増幅器 166 の雑音、特に 1/f 雑音による大きな直流ドリフトが、誤差信号 es に直接影響を与えるため、検出可能な最小周波数誤差が制限される。すなわち、誤差信号 es の検出感度が低い。このため、やはり周波数設定精度および安定度は、著しく制限される。例えば、H. Yasaka 等は、本検出方式によって安定化しても、なお 5 分間で 10 MHz 程度のドリフトが観測されたことを報告している (Electronics Letters, 8th Oct. 1987, vol.

23, No. 21, pp.1161-1162)。

また、上記(2)に関しては、次の重大な問題がある。すなわち、上述した従来例においては、誤差信号検出感度が低いため、光周波数基準として、原子・分子の吸収スペクトルを利用することが事実上不可能である。一般に、光学的干渉計(もしくは共振器)の絶対周波数安定度は、半導体レーザの発振光周波数の安定度に比べておよそ1桁以上優れており、温度安定化等により、数分間隔ではMHzオーダーの安定度を達成出来る。しかしながら、長期的には、さまざまな外因環境の変動等により、例えば1年あたり数十MHz以上の基準周波数変動が生じてしまう。これに対して、 $1.5\mu\text{m}$ 帯にあるアセチレン分子気体の吸収スペクトルやクリプトン原子の光ガルバノスペクトル、 $1.3\mu\text{m}$ 帯にあるアルゴン原子の光ガルバノスペクトル、 $0.78\mu\text{m}$ 帯にあるルビジウム原子の吸収スペクトル等は、長期的な基準周波数変動も数MHz以下と考えられ、光周波数基準として、光学的干渉計よりも格段に優れている。しかしなが

-15-

に、温度等様々な外因環境による影響を受け易くなり、長期的な安定度を制限する要因ともなり得る。

さらに、前述したような原子・分子の吸収スペクトルを利用して、高い周波数安定度を実現しようとした場合には、通常は特定の光周波数基準値にしかスペクトルが存在しないため、安定化可能な光周波数範囲が、まさに周波数 f の可変範囲によって、例えば4GHz程度に制限される。

本発明の目的は、上記問題点に鑑み、安定化に際しての光の周波数基準値が、参照電圧や光強度によらずに光周波数基準のみによって決定され、しかもその周波数基準値を高い感度で検出する誤差信号検出方式を有するとともに、原子・分子の吸収スペクトルといった優れた光の周波数基準を用いた場合でも、広い光周波数範囲にわたって、高い精度での安定化が実現出来る、優れた半導体レーザの発振周波数安定化装置を提供することにある。

「課題を解決するための手段」

ら、一般にこれらのスペクトルは、ドップラー拡がりによって数百MHzに広がっているため、これを光周波数弁別特性として利用した場合の弁別感度は、ファブリーペロー干渉計の透過特性を利用する場合に比べて、少なくとも数百分の1にとどまる。以上のような理由により、上述した従来の誤差信号検出方式では、十分な安定化をおこなうことが出来ない。

また、上述した従来例においては、半導体レーザ特有の大きな位相雑音に対処するために位相比較器152を複雑なデジタル回路で構成しているが、このために、基準信号ssの周波数 f の可変幅が、たかだか数GHzに制限される。この場合、第3図(a-2)より明らかなように、ファブリーペロー干渉計161aの周波数透過特性の周期を、例えば3GHz程度に設定しなければ、任意の光周波数値で安定化することが出来ない。しかしながら、狭い周波数間隔を実現するには、干渉計の光路長差を大きくする必要があり、装置の小型化に不利である。さらに、干渉計が大きくなるため

-16-

本発明は、上記目的を達成するため、被安定化半導体レーザからなる被安定化光周波数可変発振器の出力周波数と、参照レーザからなる参照光周波数可変発振器の出力周波数とをオフセットロックする際に、ビート信号の周波数を変換するための、局部発振器とミキサとからなる、少なくとも1段の周波数変換部を備えるとともに、前記局部発振器もしくはオフセットロック信号検出用の基準信号を発生する基準発振器に位相連続周波数変調を施すための、繰返し信号を発生する変調信号発振器と、該繰返し信号を用いて、光の周波数弁別手段が出力する検出信号から誤差信号を検出する同期検出手段とを備え、かつ前記オフセットロック信号を前記参照光周波数可変発振器の制御に用い、一方、前記誤差信号を前記被安定化光周波数可変発振器の制御に用いたことを、その最も主要な特徴とする。

「作用」

本発明によれば、ビート信号検出信号によって検出された、被安定化半導体レーザと参照レーザ

との発振光周波数の差で電氣的に振動するビート信号は、まず少なくとも1段の周波数変換部に入力される。周波数変換部では、入力信号はミキサに入力され、局発信号によって周波数変換された中間周波数信号が出力される。しかる後に、この中間周波数信号をオフセットロック信号発生部に入力し、基準信号と位相比較することにより、2台の半導体レーザの発振周波数をオフセットロックするためのオフセットロック信号が検出され、参照レーザからなる参照光周波数可変発振器にフィードバックされる。ここで、周波数変換部の局発信号の周波数を変化させることにより、オフセットロック信号発生部の位相比較手段への入力(中間周波数信号)の周波数を低く保ったまま、広い周波数範囲での周波数オフセットロックが可能となる。

また、変調信号発振器の供給する繰り返し信号により、基準信号もしくは局発信号には位相連続周波数変調が施され、この結果オフセットロック信号を介して参照レーザの出力光が周波数変調

される。すなわち、参照レーザの発振周波数の平均値(中心値)が、被安定化レーザの発振周波数にオフセットロックされた状態で、参照レーザの出力光に、周波数変調が施される。

一方、この参照レーザの出力光を含んだ検出光が、光合分波手段によって取り出され、光周波数弁別手段に入射される。この結果得られる検出信号は、同期検波手段に入力され、前記繰り返し信号によって、誤差信号が同期検出される。このような光周波数変調と同期検波技術の組合せによって、光周波数基準の周波数弁別特性の微分特性が高い感度で検出される。

そしてこの誤差信号を、被安定化半導体レーザからなる被安定化光周波数可変発振器にフィードバックすることにより、光周波数基準のみに依存した光周波数基準値を利用した、高い精度での発振周波数の安定化が可能となる。

なお、ミキサを含む周波数変換部を備えることによってオフセットロック可能な周波数範囲を拡大する方法は、ガスレーザを用いた場合につ

-19-

いて既にJ. L. Hall等により、1988年のJournal of Quantum Electronics誌第23巻の427-437頁に記載されている。本発明は、半導体レーザの周波数オフセットロックにこの手法を応用し、かつ基準信号もしくは局発信号に位相連続周波数変調を施すことにより、参照レーザを周波数変調して光周波数基準から誤差信号を同期検出するという手法を新たに加えることにより、従来例では到底実現不可能である、高い周波数安定度および設定精度を有する半導体レーザの発振周波数安定化装置を供するものとも言える。

「実施例」

以下、図面を参照して本発明の実施例について説明する。

第1図は、本発明による半導体レーザの発振周波数安定化装置の第1実施例の構成を示す図である。第1図において、10は被安定化光周波数可変発振器、20は参照光周波数可変発振器、31は光合分波手段、32はビート信号検出手段、40は1段の周波数変換部、50はオフセットロ

-20-

ック信号発生部、60は誤差信号発生部、71は変調信号発振器である。

被安定化光周波数可変発振器10は、内包される被安定化半導体レーザの発振周波数 ν が、後述する誤差信号ESの入力に基づいて、後述する設定光周波数値 ν_s と等しくなるように制御される光周波数可変発振器であり、例えば、光周波数 ν_s 近傍の単一縦モードで発振する被安定化DBRレーザ11と、被安定化DBRレーザ11の温度を一定値に保つ温度制御装置12と、被安定化DBRレーザ11の出力である被安定化光LDを透過する一方で、後段よりの反射光を極力遮断する光アイソレータ13と、誤差信号ESの入力および後述するバイアス設定信号BSの入力に基づいて、被安定化DBRレーザ11に、その発振周波数 ν を設定光周波数値 ν_s と等しくなるように制御した制御電流を供給する制御電流注入装置14と、被安定化DBRレーザ11を発振させるための注入電流を供給する電流注入装置15と、バイアス設定信号BSを供給するバイアス設定装置16と

-21-

-466-

-22-

から構成されている。

参照光周波数可変発振器 20 は、内包される参照レーザの発振周波数 ν_r が、後述するオフセットロック信号 OS の入力に基づいて、被安定化光周波数可変発振器 10 の出力する被安定化光 LD の光周波数 ν と所定の周波数差となるようにオフセットロックされる光周波数可変発振器であり、例えば、光周波数 ν_r で発振する参照 DBR レーザ 21 と、参照 DBR レーザ 21 の温度を一定値に保つ温度制御装置 22 と、参照 DBR レーザ 21 の出力である参照光 RLD を透過する一方で、後段よりの反射光を極力遮断する光アイソレータ 23 と、オフセットロック信号 OS の入力に基づいて、参照 DBR レーザ 21 に、その発振周波数 ν_r がオフセットロックされるように制御した制御電流を供給する制御電流注入装置 24 と、参照 DBR レーザ 21 を発振させるための注入電流を供給する電流注入装置 25 とから構成されている。

光合分波手段 31 は、被安定化光 LD と参照光 RLD を入力し、被安定化光の一部からなる被安

定化光出力と、少なくとも参照光 RLD の一部を含む検出光 DLD とを出力し、さらに、被安定化光 LD の一部と参照光 RLD の少なくとも一部とを、偏波状態が極力一致した状態で混合した混合光 MLD をも出力するもので、例えば、被安定化光 LD を入力して 2 分岐する第 1 の光分岐手段、例えば光カプラ 31a と、参照光 RLD を入力して 2 分岐する第 2 の光分岐手段、例えば光カプラ 31b と、光カプラ 31a の一の分岐光と光カプラ 32a の一の分岐光とを合波する光合波手段、例えば光カプラ 31c とから構成されている。

ビート信号検出手段 32 は、光合分波手段 31 の出力する混合光 MLD を入力し、光電変換により、被安定化光 LD の光周波数 ν と参照光 RLD の光周波数 ν_r の差周波数で電気的に振動するビート信号 BT を検出して出力する手段で、例えば、入力光強度に応じた光電流出力を生じる受光器 32a と、増幅器 32b とから構成されている。

周波数変換部 40 は、例えば周波数 $f = 10\text{ GHz}$ 程度の局発信号 LS を供給する局発振器、

-23-

例えばマイクロ波周波数シンセサイザ 41 と、局発信号 LS により、ビート信号 BT を周波数ダウンコバートした中間周波数信号 IF を発生するミキサ、例えばダブルバランスミキサ 42 と、中間周波数増幅器 43 とから構成されている。

オフセットロック信号発生部 50 は、例えば中心周波数 $f_{ro} = 260\text{ MHz}$ 程度で、かつ後述する繰返し信号 RS の入力により、例えば周波数偏位 $\Delta f = 10\text{ MHz}$ 程度の位相連続周波数変調を施された基準信号 SS を供給する基準発振器、例えば直接周波数シンセサイザ 51 と、入力される中間周波数信号 IF の位相と、基準信号 SS の位相とを、例えば $\pm 5120\pi$ の範囲で比較可能なディジタル回路で構成された位相比較器 52 と、例えばローパスフィルタとラグリードフィルタとを組み合わせたループフィルタ 53 とから構成されている。

誤差信号発生部 60 は、光設定周波数値 ν_s の近傍に光周波数基準値 ν_{ro} で極大もしくは極小となる光周波数弁別特性を有する、例えば導波路型

-24-

リング共振器(光周波数基準) 61a と受光器 61b とから構成される光周波数弁別手段 61 と、光周波数弁別手段 61 に、前記光合分波手段 31 の出力する検出光 DLD を入力して検出される検出信号 DS から、繰返し信号 RS と同期した成分を検出する同期検波手段、例えばロックインアンプ 62 と、該同期検波手段により検出された信号の入力により、誤差信号 ES を出力する PID 制御器 63 とから構成されている。

変調信号発振器 71 は、前記直接周波数シンセサイザ 51 と前記ロックインアンプ 62 とに、例えば周波数 $f_m = 1\text{ kHz}$ 程度の繰返し信号 RS を供給する手段である。

次に、上記構成による、半導体レーザ(被安定化 DBR レーザ 11)の発振周波数安定化の動作を説明する。なお、オフセットロック信号発生部 50 による参照光周波数可変発振器 20 の制御帯域(ループ帯域)は、繰返し信号 RS の周波数 f_m より大きく、例えば 10 kHz 以上に設定され、また、誤差信号発生部 60 による被安定化光周波数

可変発振器 10 の制御帯域は、周波数 f_m より小さく、例えば 100 Hz 程度以下に設定されているものとする。

まず、被安定化光周波数可変発振器 10 および参照光周波数可変発振器 20 の動作を説明する。被安定化 DBR レーザ 11 および参照 DBR レーザ 21 は、それぞれの活性層領域に電流注入装置 15 および 25 を用いて電流を注入することにより、単一縦モードで発振する。ここで、それぞれのレーザの温度揺らぎは、温度制御装置 12 および 22 で、例えば $1/100$ 度程度に抑えられている。一方、それぞれのレーザの分布反射層 (DBR) 領域には、制御電流注入装置 14 および 24 により、適当にバイアスされた制御電流が注入されている。ここで、上記制御電流注入装置 14 および 24 は、誤差信号 E_S およびオフセットロック信号 O_S の入力に応じて、それぞれの制御電流を変化させる。さらに制御電流注入装置 14 は、バイアス設定装置 16 の出力するバイアス設定信号 B_S の入力によっても、その出力する制御電流

を変化させる。

一般に、単一縦モードで発振している DBR レーザの発振光周波数は、DBR 領域への制御電流の注入量によって例えば 1 GHz/mA 程度の割合で変化し、かつその制御特性 (周波数変調特性とも呼ばれる) は 100 MHz 以上まで平坦で、しかも位相回転が生じない (例えば、IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-23, No. 6, pp. 835-838, 1987, S. Murata et al., "Spectral Characteristics for a 1.5 μ m DBR Laser with Frequency-Tuning Region." 参照)。したがって、光アイソレータ 13 を介して取り出される被安定化光 LD の光周波数 ν と、光アイソレータ 23 を介して取り出される参照光 RLD の光周波数 ν_r は、それぞれ、誤差信号 E_S およびオフセットロック信号 O_S により制御される。

被安定化光 LD および参照光 RLD は、光カブラ 31a および 31b によってそれぞれ 2 分岐され、それぞれの 1 の分岐光が光カブラ 31c に出力されて合波され、混合光 MLD として出力される。

-27-

一方、光カブラ 31b の他の分岐光は、検出光 LD として、誤差信号発生部 60 の光周波数弁別手段 61 に出力される。

ビート信号検出手段 32 では、光カブラ 31c の 1 の出力である混合光 MLD が、受光器 32a で受光され、光電変換により生成された周波数 f_b のビート信号 B_T が、増幅器 32b で増幅されて周波数変換部 40 のダブルバランスミキサ 42 に出力される。なお、ビート周波数 f_b は、被安定化光 LD の光周波数 ν と、参照光 RLD の光周波数 ν_r の差で与えられる。

周波数変換部 40 では、ダブルバランスミキサ 42 において、周波数 f_b のビート信号 B_T の入力、マイクロ波周波数シンセサイザ 41 の供給する周波数 f の局発信号 L_S によって、周波数 $f_{IF} = |f_b - f|$ の中間周波数信号 I_F に変換され、中間周波数増幅器 43 で増幅されて、オフセットロック信号発生部 50 の位相比較器 52 に出力される。なお、中間周波数増幅器 43 は、ダブルバランスミキサ 42 において発生するイメージ信

-28-

号を除去するフィルタの働きも、合わせ持つ。

オフセットロック信号発生部 50 では、中間周波数信号 I_F の入力、直接周波数シンセサイザ 51 の供給する周波数 f_r の基準信号 S_S と、位相比較器 52 で位相比較される。その位相差は、ループフィルタ 53 を介して、オフセットロック信号 O_S として参照光周波数可変発振器 20 にフィードバックされる。ここで、中間周波数信号 I_F の周波数 f_{IF} と、基準信号 S_S の周波数 f_r とが異なっていると、位相は周波数の積分値であるので、位相比較器 52 で検出される位相差は、単調に増加もしくは減少していく。したがって、この位相差に基づくオフセットロック信号 O_S によって、参照光 RLD の光周波数 ν_r をフィードバック制御することにより、その光周波数値は、被安定化光 LD の光周波数 ν と、ある一定値だけ異なった値に、周波数誤差なく安定化される。すなわち、光周波数 ν_r が、オフセットロックされる。ここで、このフィードバックループにおける光ロックレンジは、ループフィルタ 53 に積分特性を付加

するなどすることにより、例えば100GHz程度以上に出来る。すなわち、被安定化光LDの光周波数 ν が100GHz変化しても、オフセットロックした状態を保つことが可能である。

一方、直接周波数シンセサイザ51の供給する基準信号SSの周波数 f_r には、変調信号発振器71の供給する周波数 f_m の繰返し信号RSにより、周波数偏移 Δf_r の位相連続周波数変調が施され、その平均周波数が、 f_{r0} となっている。したがって、参照光RLDの周波数 ν_r には、変調周波数 f_m 、周波数偏移 Δf_r の周波数変調が施され、かつその中心周波数 ν_{r0} は、被安定化光LDの光周波数 ν とある一定値だけ異なった値に安定化されている。

第4図は、上述した一連の光周波数オフセットロッキング動作によって制御された、参照光RLDの光周波数配置を説明するための図である。すなわち、例えば、第4図の①は、被安定化光LDの光周波数 ν が参照光RLDの光周波数 ν_r よりも大きく、かつ両光の差周波数に相当するビート周波数 f_b が、周波数変換部40における局発信号

LSの周波数 f よりも大きい状態でオフセットロックされた場合の、光周波数配置を示している。この場合、参照光RLDの光周波数 ν_r には、周波数変調が施され、かつその中心周波数 ν_{r0} が、 $\nu - f - f_{r0}$ に安定化されている。

なお、第4図①および④の状態にロックされるか、あるいは第4図②および③の状態にロックされるかは、オフセットロック信号OSによる光周波数 ν_r のフィードバック制御の向きにより一意に決定され、かつビート信号BTの周波数 f_b を観測することにより、例えば、①と④のどちらの状態にオフセットロックされているかを判別することが可能である。

一方、誤差信号発生部60の動作は、以下のよう説明される。

第1図において、光カプラ31bの他の分岐光からなる検出光DL Dは、導波路型リング共振器61aに入射され、その出力光が受光器61bに導かれ、光電変換による検出信号DSを生じる。ここで、導波路型リング共振器61aは、ファブリ

- 31 -

ーペロー干渉計と同様な周期的な光周波数弁別特性を与えるので、光周波数弁別手段61は、第3図(a-1)と同様な周期的周波数弁別特性を示す。そして、周波数変換部40の局発信号LSの周波数 f を変化させるか、あるいは被安定化光周波数可変発振器10のDC電流設定装置16の出力するバイアス設定信号BSにより光周波数 ν を変化させることによって、検出光DL Dの光周波数 ν_r は、光周波数弁別手段61の弁別特性が極大となる、適当な光周波数値 ν_{on} (光周波数基準値)の近傍に設定することが出来る。

この状態で、ロックインアンプ62は、検出信号DSを、変調信号発振器71の供給する周波数 f_m の繰返し信号RSで同期検波する。これにより、光周波数弁別手段61の与える光周波数基準値 ν_{on} と、参照光RLDの中心光周波数 ν_{r0} との周波数差に応じた出力がPID制御器63に出力され、被安定化光周波数可変発振器10の光周波数 ν を安定化するための誤差信号ESが得られる。

第5図は、上記した一連の光周波数 ν の安定化

- 32 -

動作例を、原理的に示した図である。ここでは、第4図③に示した状態で光周波数のオフセットロッキングがかかっている場合を想定している。被安定化DBRレーザ11の発振周波数 ν は、周波数基準値 ν_{on} 、局発信号LSの周波数 f 、および基準信号SSの中心周波数 f_{r0} を用いて、

$$\nu_s = \nu_{on} - f - f_{r0} \quad \dots \dots (3)$$

で与えられる、設定光周波数値 ν_s に安定化される。すなわち、第5図(a)に示すように、被安定化DBRレーザ11の発振周波数 ν が、 $\nu_{on} - f - f_{r0}$ (= ν_s)よりも小さい場合、同図中DSaで示す検出信号が光周波数弁別手段51で検出され、これに基づく誤差信号は、同図中ESaで示すような、例えばマイナス(-)の信号となる。従って、制御電流注入装置14は、被安定化DBRレーザ11の発振周波数 ν が増加するように制御する。

また、第5図の(b)に示すように、発振周波数 ν が、設定光周波数値 $\nu_{on} - f - f_{r0}$ (= ν_s)よりも大きい場合、同図中DSbで示す検出信号が光周波数弁別手段51で検出され、これに基づく誤

差信号は、同図中E S bで示すような、例えばプラス(+)の信号となる。従って、制御電流注入装置14は、被安定化D B Rレーザ11の発振周波数 ν が減少するように制御する。

そして、第5図の(c)に示すように、発振周波数 ν が設定光周波数値 $\nu_{on}-f-f_{ro}(=\nu_s)$ に等しくなれば、同図中D S cで示す検出信号が光周波数弁別手段51で検出され、これに基づく誤差信号は、同図中E S cで示すような、「±0」の信号となる。従って、このとき、被安定化D B Rレーザ11の発振周波数 ν はそのままの状態に保たれる。

以上説明したように、上述した第1実施例によれば、基準信号S Sに位相連続周波数変調を施すことにより、参照光周波数可変発振器20を周波数変調し、周波数変調された参照光R L Dから分岐された検出光D L Dを用いて、光周波数弁別手段61から誤差信号E Sを同期検出するため、導波路型リング共振器61aのみ依存した光周波数基準値を、しかも高い感度で検出することが可能

-35-

することが可能となる。これにより、第3図(a-2)に示した原理によって、広い周波数可変帯域内の任意の周波数値への安定化を可能とするためには、導波路型リング共振器61aの共振間隔 $\Delta\nu$ は、例えば10GHzに設定すればよい。このため、リング共振器61aは、 $\Delta\nu$ が3GHzのものに比べて約1/3に小型化される上、これにより、高い精度での温度安定化等が容易に実現出来るようになる。こうして、やはり周波数安定度や設定精度の向上が可能となる。

さらに、前記した様な、原子・分子の吸収スペクトルといった光周波数基準を光周波数弁別手段61に用いた場合には、その安定化可能な光周波数の範囲は、被安定化光L Dと参照光R L Dの周波数差に限定される。したがって、上述した周波数変換部40の働きにより、安定化可能な光周波数の範囲が、10GHz以上に拡大されることになる。

さらに、同第1実施例は、局発信号fの周波数を掃引することで、光周波数を掃引させることも

となり、高い周波数安定度や設定精度が実現出来る。

なお、上述した周波数変調光と同期検出方式の組合せによれば、例えばY. C. Chungにより1989年のPHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS誌第1巻の135-136頁に報告されているような、分子・原子のスペクトルという優れた光周波数基準からも誤差信号E Sを検出出来るため、より高い精度での周波数設定や安定化が可能となる。

また、上述した第1実施例においては、参照レーザからなる参照光周波数可変発振器20をオフセットロックする際に、ビート信号B Tの周波数を、局発信号L Sを用いて周波数変換(ダウコンバート)してから、オフセットロック信号発生部50に加えるため、局発信号L Sの周波数fを、例えば10GHz程度変化させることにより、比較的低速なデジタル回路により構成された位相比較器52への入力周波数を、例えば260MHz程度に保ったまま、10GHz以上の広い周波数範囲で、被安定化光と参照光の光周波数差を設定

-36-

可能で、光周波数スーパとしても応用可能である。

なお、同第1実施例において、光カプラ31cにおいて合波する際には、両光の偏波状態が極力一致するように注意する必要がある、光配線および光合分波手段31は、偏波保持ファイバおよび偏波保持カプラを用いて構成することが望ましい。しかしながら、通常のシングルモードの光ファイバおよび光ファイバカプラを用いても、その光配線の全長を例えば1m以内程度に抑え、かつ安定な環境下に収納することにより、最初に偏波が一致するように調整して光配線することだけでも、十分に対処可能である。もちろん、ハーフミラーを組み合わせ、光空間配線を行なってもよい。

また、同第1実施例において、被安定化光周波数可変発振器10および参照光周波数可変発振器20を構成する半導体レーザとして、2電極型のD B Rレーザを用いたが、これに限定されるものではなく、多電極D F Bレーザや、3つ以上の電極もしくは領域を有するD B Rレーザ、あるいは、

外部鏡構造を有する半導体レーザなどを用いてもよい。この場合、電流注入装置 15 と制御電流注入装置 14 は、実際の被安定化レーザの電極構成によって、数が複数になったり、あるいは両者の役目を兼ね備えたものが利用される。また、参照光周波数可変発振器 20 にも、被安定化光周波数可変発振器 10 のバイアス設定装置 16 と同様な装置を設けることにより、周波数オフセットロッキング動作を、より簡便に開始することも可能である。さらに、被安定化光の光周波数 ν を設定光周波数値 ν_s に近づける際には、温度制御装置 12 を用いて被安定化 DBR レーザ 11 の温度を変化させてもよく、またこの際に、参照 DBR レーザの温度も、同時に温度制御装置 22 を用いて変化させてもよい。

また、同第 1 実施例においては、光周波数弁別手段 61 を、導波路型リング共振器 61a と受光器 61b で構成したが、これに限定されるものではなく、ファブリペロー干渉計や、アセチレン分子もしくは他の分子や原子の気体を封入したセ

ルなど、その透過もしくは反射特性が、特性の光周波数において極大もしくは極小を示す光周波数基準と、受光器との組み合わせを用いてもよく、また、クリプトン原子の光ガルバノスペクトルのように、放電気体中に検出光 DLD を照射した場合の放電電流を検出信号 DS とするような光周波数弁別手段を利用しても勿論よい。

また、同第 1 実施例においては、ビート信号検出手段 32 を、ビート信号 BT を増幅する増幅器 32b を含めて構成しているが、これは必ずしも必要不可欠な構成要素ではなく、受光器 32a で検出されるビート信号 BT が、雑音に対して十分大きければ、省略することが可能である。同様に、中間周波数増幅器 43 も、ダブルバランスミキサ 42 で検出される中間周波数信号 IF が十分大きく、かつ発生するイメージ信号が位相比較器 52 の入力帯域外であれば、省略することが可能である。さらに、誤差信号発生部 60 の PID 制御器 63 も、例えば比例係数 1 の比例制御のみを行なう場合には、省略される。

- 39 -

また、同第 1 実施例においては、周波数変換部 40 のミキサとして、ビート信号 BT の周波数 f_b と局発信号 LS の周波数 f の差周波数を有する中間周波数信号 IF を出力するダブルバランスミキサ 42 を用いたが、この代わりに、ビート信号 BT の周波数 f_b と、局発信号 LS の周波数 f の整数倍の周波数 ($n f$) との差周波数を有する中間周波数信号 IF を出力する、パーモニックミキサを用いてもよい。さらに、ここでは、1 段の周波数変換のみを行なっているが、より高い、あるいは広い周波数範囲をカバーするために、複数段での周波数変換を行なっても勿論よい。

また、同第 1 実施例においては、基準信号 SS に位相連続周波数変調を施しているが、この代わりに、周波数変換部 40 の局発信号 LS に、位相連続周波数変調を施してもよい。

また、同第 1 実施例においては、周波数変換部 40 の局発振器と、オフセットロック信号発生部 50 の基準発振器は、それぞれ独立な発振器を用いているが、例えば kHz 以下といったきわめて

- 40 -

高い精度でのビート周波数設定が求められる場合には、別の周波数基準発振器に両発振器を同期させることにより、精度を高めることが可能である。

また、同第 1 実施例においては、繰り返し信号 RS の周波数 f_m を 1 kHz 程度、オフセットロック信号発生部 50 による参照光周波数発振器 20 の制御帯域(ループ帯域)を 10 kHz 以上、誤差信号発生部 60 による被安定化光周波数可変発振器 10 の制御帯域を 100 Hz 程度以下として説明したが、これらの数値はおおよその相対的な大小関係を示すために用いたもので、何等これらの周波数値に限定されるものではない。

次に、第 6 図は、本発明による半導体レーザの発振周波数安定化装置の第 2 実施例の構成を示す図である。この第 2 実施例が、前述した第 1 実施例と異なる点は、光合分波手段 31 が、被安定化光 LD を 2 分岐する第 1 の光分岐手段、例えば光カプラ 31a と、該第 1 の光分岐手段の一分岐光と、参照光 RLD とを合波して 2 つの混合光を出力する光合波手段、例えば光カプラ 31d とか

- 41 -

- 471 -

- 42 -

ら構成されていることにある。

次に、このように構成された第2実施例の動作を前述した第1実施例と異なる部分についてのみ説明する。

被安定化光周波数可変発振器10の出力する被安定化光LDは、光カブラ31aで2分岐され、その一の分岐光が、参照光周波数可変発振器20の出力する参照光RLDと光カブラ31dで混合される。ここで、両光の偏波状態が、極力一致するように注意する。そして、光カブラ31dの一分岐光が混合光MLDとしてビート信号検出手段32に出力され、一方、他の分岐光が、検出光DL Dとして誤差信号発生部60に出力される。

ここで、検出光DL Dには、参照光RL Dのみならず、被安定化光LDも含まれている。したがって、光周波数弁別手段61から出力される検出信号DSには、被安定化光LDの光周波数 ν に依存した成分も含まれる。しかしながら、繰り返し信号RSによって周波数変調されているのは参照光RL Dのみであるので、ロックインアンプ62で

同期検出されるのは、第1実施例と同じく、参照光RL Dの中心光周波数 ν_r と、光周波数基準地 ν_{on} との差に対処する誤差信号となる。

このような第2実施例によれば、受光器61bに入射する被安定化光の成分が背景光となるため、誤差信号の検出感度が若干制御されるが、しかし、光合分波手段31を、2つの光カブラで構成することが出来、光回路の簡便化に有効である。なお、この第2実施例においても、第1実施例で説明した本発明の特徴がすべて当てはまることは言うまでもない。

「発明の効果」

以上詳述したように、本発明によれば、周波数変換部を設けてビート周波数を変換することで、基準信号と位相比較する際の位相比較器の動作速度を低く抑えたまま広いビート周波数範囲での光周波数オフセットロックリングが可能となり、さらに、基準信号もしくは周波数変換部の局発信号に位相連続周波数変調を施すことにより、参照光を周波数変調して、フリップリーベロー干渉計などの

- 43 -

周波数基準のみに依存する光周波数基準値からの誤差信号を、高い感度で同期検出することが可能となる。そして、位相比較から導かれるオフセットロック信号を用いて参照レーザの発振周波数を制御し、一方、前記誤差信号を用いて被安定化半導体レーザ発振周波数を制御することにより、広い光周波数範囲にわたって、高い設定精度および安定度で、被安定化半導体レーザの発振周波数を安定化することが可能となる。また、誤差信号検出感度の改善により、光周波数基準として優れた性能を示す原子・分子のスペクトルの利用が可能となり、かつ周波数変換部の採用により、基準値周辺で安定化出来る光周波数範囲が10GHz以上に拡大されることは、特に有効な利点である。

4. 図面の簡単な説明

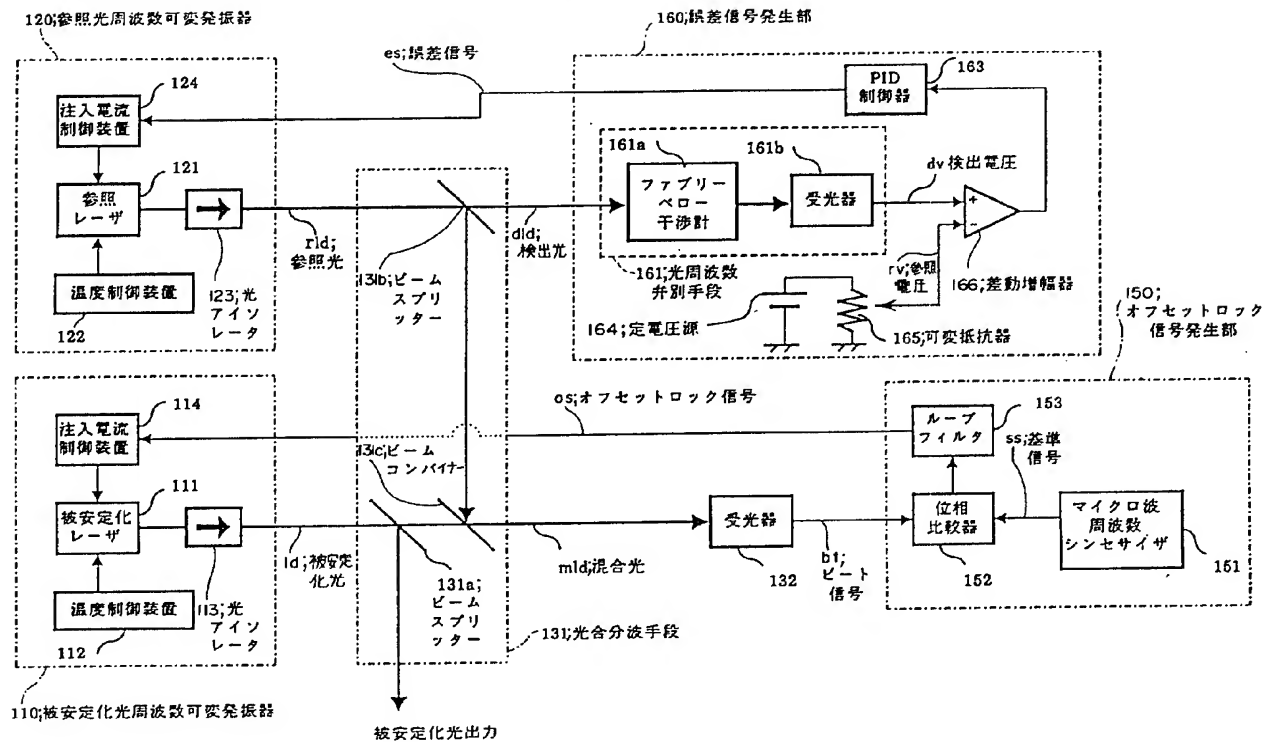
第1図は本発明の第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示すブロック図、第2図は従来例による半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示すブロック図、第3図は同従来例による半導体レーザの発振周波数安定

- 44 -

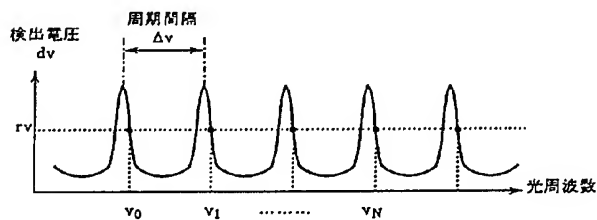
化動作を説明するための図、第4図は本発明の第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作を説明するための図、第5図は本発明の第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作を説明するための図、第6図は本発明の第2実施例による半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示す図である。

- 10 ……被安定化光周波数可変発振器、
- 11 ……被安定化DBRレーザ、
- 20 ……参照光周波数可変発振器、
- 21 ……参照DBRレーザ、
- 31 ……光合分波手段、
- 32 ……ビート信号検出手段、
- 40 ……周波数変換部、
- 41 ……マイクロ波周波数シンセサイザ
(局発振器)、
- 42 ……ダブルバランスミキサ、
- 50 ……オフセットロック信号発生部、
- 51 ……直接周波数シンセサイザ(基準発振器)、

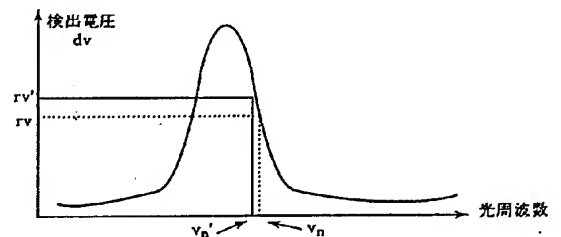
第2図 (従来例の構成)



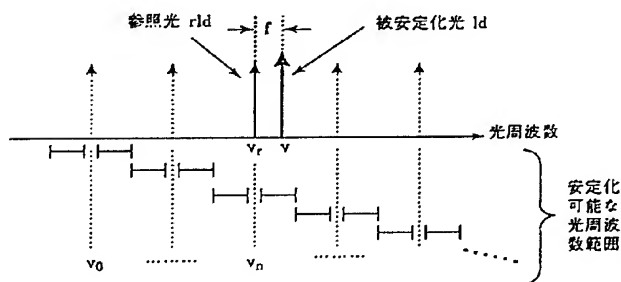
第3図 (従来例による半導体レーザの発振周波数安定化動作の説明)



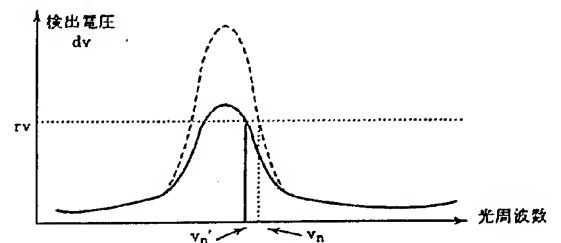
(a-1) 光周波数弁別手段161の特性



(b-1) 比較電圧rvによる設定周波数の変化

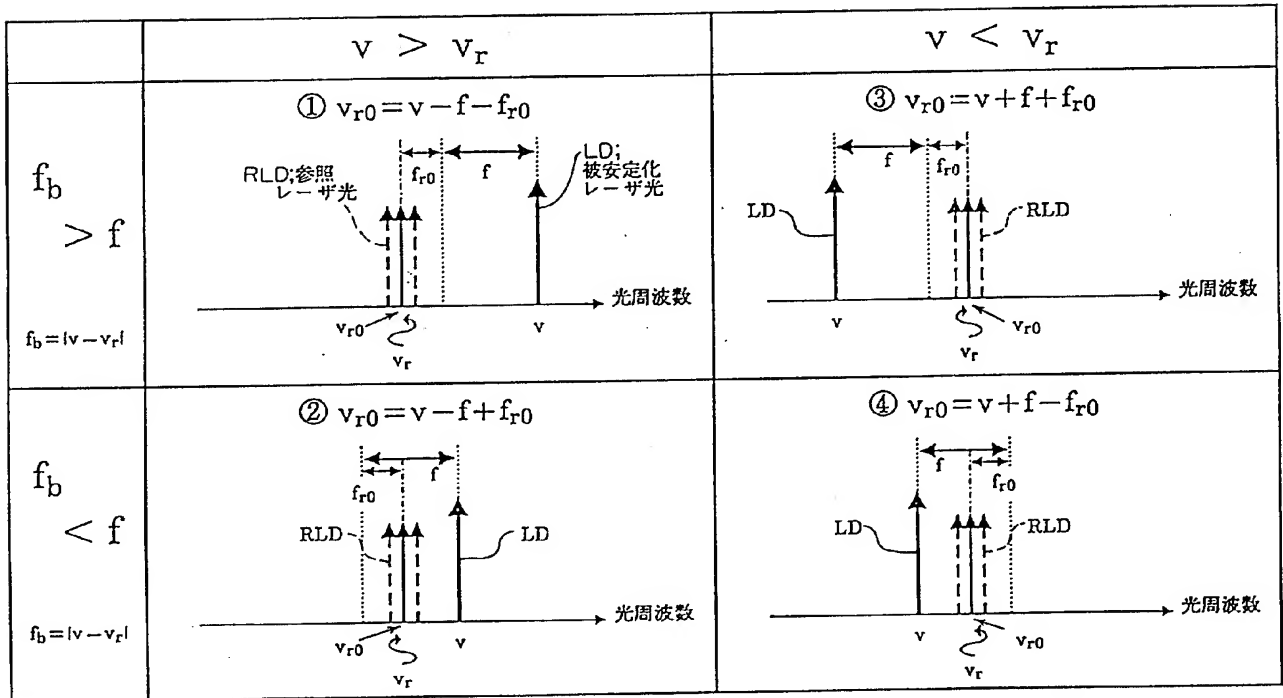


(a-2) 広い周波数範囲での安定化の仕組み

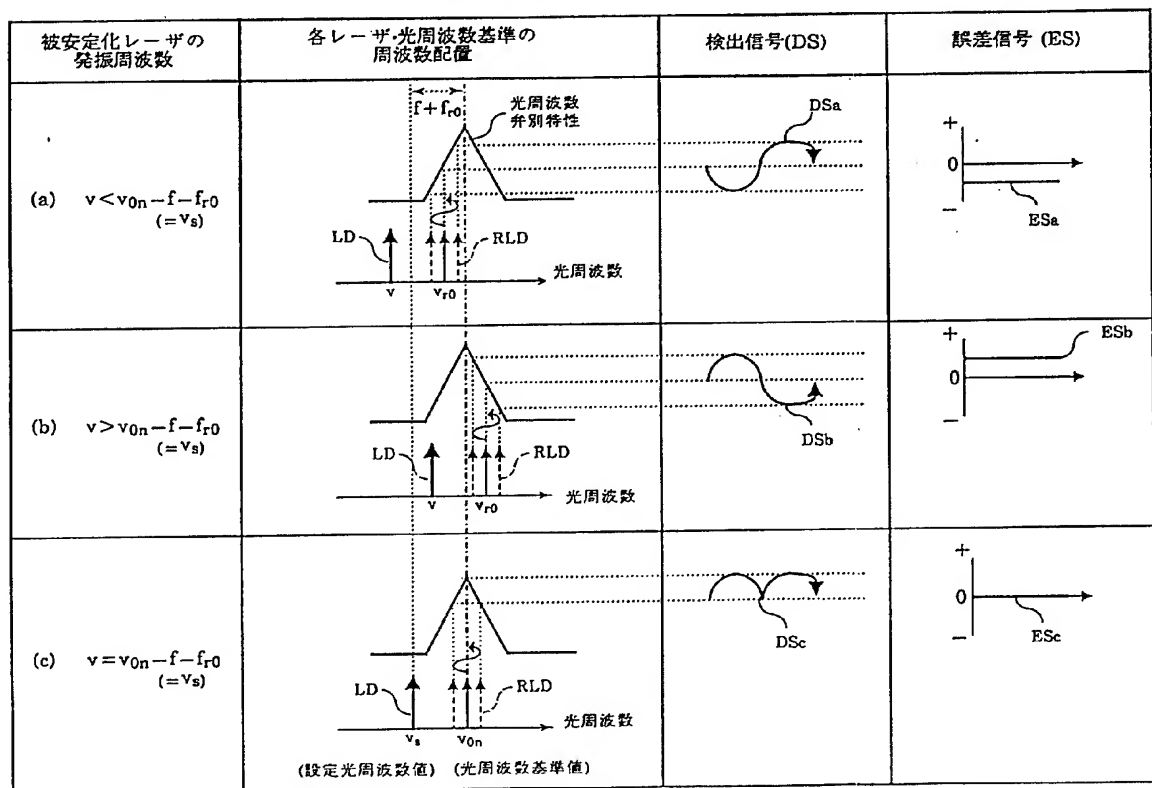


(b-2) 光強度変動による設定周波数のずれ

第 4 図 (第 1 実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作の説明)



第 5 図 (第 1 実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作の説明)



第 6 図 (第2実施例の構成)

